

На правах рукописи

Сибгатуллин Мансур Эмерович

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ЗВЕЗД
НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2006

Работа выполнена на кафедре оптики и нанофотоники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Салахов Мякзюм Халимуллович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук,
доцент Харинцев Сергей Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Юльметьев Ренат Музипович

кандидат физико-математических наук,
доцент Михеев Игорь Дмитриевич

Ведущая организация: Саратовский государственный университет
им. Н.Г.Чернышевского

Защита состоится «___» декабря 2006 г. В _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.07 в Казанском государственном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И.Лобачевского Казанского государственного университета

Автореферат разослан «___» ноября 2006г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Сарандаев Е.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. При обработке оптических спектров звезд одной из проблем является учет влияния шума, искажающего экспериментальные данные. В результате математической обработки спектроскопического эксперимента возможно получить более полную и достоверную информацию о физике процессов, происходящих в атмосферах звезд.

При обработке экспериментальных данных в прикладной спектроскопии наибольшее распространение получили метод Савицкого–Голея, фильтр Кайзера, метод статистической регуляризации и др. Область применения данных методов ограничивается предположениями о стационарности сигнала и некоррелированной природе шума. Оптическая спектроскопия звезд имеет ряд особенностей. Для определения физики звездных атмосфер необходимы спектры с высоким и сверхвысоким разрешением (0.001-0.01 нм), так как при этом появляется возможность зарегистрировать профили отдельных линий, которые определяются физикой атмосфер и параметрами взаимодействия атомов и фотонов в атмосферах звезд. Получаемые оптические спектры могут характеризоваться малым отношением сигнал/шум, сложной формой профилей спектральных линий и обладать коррелированной структурой шума. В этом случае требуется разработка и привлечение новых математических методов для решения задачи обработки оптических спектров звезд.

Использование размерности Ричардсона, показателя Херста, относительной дисперсии, энтропии, как количественных характеристик экспериментального шума (КХШ), и вейвлет-анализа позволяет улучшить качество обработки спектров звезд. КХШ могут быть применены для получения априорной информации о спектроскопическом эксперименте. Вейвлет-анализ является эффективным инструментом обработки сложных и нестационарных сигналов и может быть использован при математической обработке оптических спектров звезд. При этом совместное использование КХШ и ВА позволяет проводить эффективный анализ оптических спектров с целью получения дополнительной информации о природе экспериментального шума в случае малого отношения сигнал/шум.

С помощью методов обработки оптических спектров звезд на основе вейвлет-анализа и привлечения априорной информации о природе шума с использованием количественных характеристик шума можно существенно улучшить качество обработки в случае малого отношения сигнал/шум, сложной формы спектральных контуров и коррелированной структуры шума. Таким образом, исследования, проведенные в диссертационной работе, являются *актуальными и практически значимыми*.

Целью данной диссертационной работы является разработка новых и использование существующих методов математической обработки искаженных шумом оптических спектров звезд, с малым отношением сигнал/шум, на основе вейвлет-анализа.

Основные задачи исследований включают в себя:

1. Исследование возможности применения размерности Ричардсона, показателя Херста, относительной дисперсии и энтропии в прикладной спектроскопии для получения априорной информации об экспериментальных данных в случае малого отношения сигнал/шум.
2. Решение проблемы выбора базисного вейвлета в задаче удаления шума из экспериментальных данных.
3. Изучение возможностей использования вейвлет-анализа при обработке оптических спектров звезд с малым отношением сигнал/шум, искаженных коррелированным шумом.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для получения априорной информации о спектроскопическом эксперименте может быть использован метод расчета характеристик шума в вейвлет-пространстве.
2. Вейвлет-анализ с использованием в качестве базисного вейвлета койфлета пятого порядка позволяет учесть влияние высокочастотного случайного шума в случае малого отношения сигнал/шум.
3. Использование итерационной схемы удаления шума в вейвлет-пространстве с учетом априорной информации о структуре экспериментального шума позволяет восстановить форму спектральных линий в оптических спектрах звезд в случае низкочастотного шума.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые предложено проводить расчет количественных характеристик шума в вейвлет-пространстве с целью получения априорной информации о спектроскопическом эксперименте.
2. Показано, что вейвлет-анализ с использованием в качестве базисной функции койфлета пятого порядка позволяет удалять высокочастотный шум из оптических спектров без привлечения априорной информации о структуре шума.
3. Разработан новый метод удаления шума, основанный на применении итерационной схемы в вейвлет-пространстве. Проведенный сравнительный анализ показал эффективность предложенной схемы при обработке сигналов искаженных шумом с коррелированной структурой.

Научная и практическая значимость работы заключается в том, что были предложены новые методы обработки экспериментальных данных на основе вейвлет-анализа, которые позволяют проводить качественную и достоверную обработку оптических спектров звезд в случае малого отношения сигнал/шум. Предлагаемые подходы могут быть также использованы при обработке результатов других экспериментов, когда требуется анализ искаженных сигналов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается многократной проверкой и отработкой предлагаемых методов, анализом качества обработки различных модельных сигналов, подобных встречающимся в эксперименте, воспроизводимостью получаемых решений.

Личный вклад автора. Все результаты диссертации получены автором лично или непосредственно при его участии. Основные результаты докладывались на международных и всероссийских конференциях.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на научных семинарах кафедры оптики и нанофотоники физического факультета КГУ; на VIII международном симпозиуме по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (Калининград, 2005); на юбилейной научной конференции физического факультета (Казань, 2004); на итоговой конференции Казанского государственного университета

(Казань, 2004, 2005); на итоговой научной студенческой конференции физического факультета Казанского государственного университета (Казань, 2003); на международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам "Ломоносов-2006" (Москва, 2006); на 10 Всероссийской школе-семинаре "Волновые явления в неоднородных средах" (Москва, 2006); на V-X международных молодежных научных школах "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" (Казань, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005 и 2006);

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 17 работ, из них 6 статей в центральной научной печати, 11 статей и тезисов в сборниках конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка авторской и цитированной литературы, трех приложений. Объем работы составляет 119 страниц, включая 46 рисунков и 5 таблиц. Список цитированной литературы содержит 118 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, цель и задачи исследований, формулируется научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе формулируется постановка задач, описываются особенности, возникающие при спектроскопическом исследовании звезд. При обработке оптических спектров звезд приходится решать обратные задачи: имея экспериментальный контур испускания и (или) контур поглощения, необходимо оценить исходные параметры исследуемого объекта. В математической постановке этот класс задач может быть представлен в следующем виде:

$$K\varphi = f, \quad \varphi \in \Phi, \quad f \in F, \quad (1)$$

где Φ и F некоторые метрические пространства, K – непрерывный оператор, переводящий элементы $\varphi \in \Phi$ в элементы $f \in F$. В физических терминах $f = f_0 + \xi$ (f_0 – точные выходные данные) интерпретируется как искаженный случайным шумом ξ выходной сигнал прибора K , на вход которого поступил

сигнал φ . Как правило, линейный оператор K , моделирующий измерительный прибор, является непрерывным.

Также были изложены наиболее эффективные существующие методы обработки экспериментальных данных, такие как метод Савицкого-Голея, фильтр Кайзера, метод статистической регуляризации. Рассмотрены основы вейвлет-анализа, который, как будет показано в дальнейшем, может быть успешно использован при обработке оптических спектров звезд.

Во **второй главе** рассматриваются методы обработки сигналов, основанные на использовании вейвлет-анализа. Для получения априорной информации об экспериментальных сигналах предложено использовать несколько параметров, описывающих наблюдаемый процесс, и на основе их совокупного анализа делать вывод о структуре исследуемого явления. При этом используется следующий комплекс параметров: энергетический спектр фурье-преобразования, глобальный спектр энергии коэффициентов непрерывного и дискретного вейвлет-преобразований [1,2]. Применялись количественные характеристики шума: размерность Ричардсона, относительная дисперсия, показатель Херста, энтропия. Приведены результаты модельных расчетов КХШ для шумов со сложной спектральной структурой. Показано, что с увеличением степени коррелированности шума происходит рост параметра Херста, уменьшение значений относительной дисперсии и размерности Ричардсона. Также показано, что рассмотренные КХШ, за исключением энтропии, инвариантны относительно амплитуды шума. Применение данных характеристик при анализе шума с коррелированной структурой в спектрах с малым отношением сигнал/шум не дает информации об увеличении влияния низкочастотной компоненты шума на полезный сигнал. Поэтому было предложено использовать процедуру вычисления характеристик в вейвлет-пространстве [3-6]. Это позволило получить дополнительную информацию о шуме в случае малого отношения сигнал/шум. В работе используется дискретный вейвлет-анализ как инструмент разложения исследуемого процесса на масштабные составляющие, и вычисляются КХШ для каждой масштабной компоненты в отдельности. Энтропия и дисперсия могут быть использованы как уникальные характеристики для каждой масштабной компоненты сигнала.

Проведенные модельные эксперименты показали эффективность предлагаемых подходов при анализе сигналов и возможность их использования для получения априорной информации о спектроскопических экспериментальных данных.

В этой главе также рассматриваются методы обработки сигналов с использованием вейвлет-анализа в случае малого отношения сигнал/шум и сложной спектральной структуры шума. Наиболее простым способом учета влияния искажений с использованием вейвлет-анализа является удаление определенных масштабов, которые содержат шумовую компоненту сигнала. В этом случае оценка решения $\tilde{\varphi}$ запишется следующим образом:

$$\tilde{\varphi} = W^{-1} R(j, j_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}}, k) W f, \quad (2)$$

где f - обрабатываемый сигнал, W - дискретное вейвлет-преобразование, W^{-1} - обратное дискретное вейвлет-преобразование, $R(j, j_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}}, k)$ - функция аподизации, зависящая в общем случае от масштаба j и сдвига k вейвлет-преобразования сигнала и определяемая в следующем виде:

$$R(j, j_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}}, k) = \begin{cases} 1, j \geq j_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}}, \forall k \\ 0, j < j_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}}, \forall k \end{cases}, \quad (3)$$

где $j_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}}$ - граничный масштаб. Параметр $j_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}}$ в данном случае определяет масштаб, который разделяет полезную составляющую сигнала и его шумовую компоненту. В работе в качестве критерия для выбора граничного масштаба предлагается использовать минимум спектра мощности вейвлет-преобразования [7-12].

При использовании вейвлет-анализа в задаче обработки экспериментальных данных неизбежно возникает вопрос о том, какой вейвлет использовать в качестве базиса. Результаты восстановления сигнала с использованием вейвлет-анализа всегда будут зависеть от вида используемого базисного вейвлета. Существующее многообразие базисных вейвлетов, с одной стороны, предоставляет исследователю известную гибкость при их выборе с целью достижения наилучшего результата, с другой стороны, неверный выбор базисного вейвлета может привести к менее достоверному представлению результатов математической обработки экспериментальных данных. В случае обработки оптических спектров звезд использовать схемы создания базисных

вейвлетов, адаптированных к форме обрабатываемого сигнала, является затруднительным, так как сигналы характеризуются высоким относительным уровнем шума и сложной формой контуров, не описываемых однозначно моделями Лоренца или Гаусса. В работе использовалась следующая схема выбора базисного вейвлета [13-15]. Создавался модельный сигнал, подобный по форме экспериментальным данным, которые планировалось подвергнуть математической обработке. После этого производилась обработка модельных данных и определялось качество восстановления сигнала σ . Выбор базисного вейвлета осуществлялся из условия минимума отклонения восстановленного сигнала от истинного. Таким образом, определялся базисный вейвлет, вносящий наименьшие искажения в обрабатываемый сигнал. Этот базисный вейвлет в дальнейшем предлагается использовать при обработке экспериментальных данных. В качестве одного из модельных сигналов в работе был использован сложный модельный спектр, состоящий из асимметричного контура сложной формы и контура, центральную часть которого можно рассматривать как профиль сложной формы. Выбор подобного модельного сигнала обусловлен тем, что экспериментальные спектральные линии могут иметь структуру, не описываемую однозначно какой-либо моделью (контурами Лоренца, Гаусса, Фойгта и т.д.) и характеризоваться асимметрией и (или) сложной формой центральной части контура. Показано, что наилучшие результаты среди семейств вейвлетов Добечи, койфлетов и биортогональных вейвлетов достигаются при использовании койфлета пятого порядка. Показана высокая эффективность данного подхода при обработке сигналов с малым отношением сигнал/шум.

Предложен метод удаления шума, основанный на применении итерационной схемы в вейвлет-пространстве (ИСВП) с использованием априорной информации о характере шума, искажающего экспериментальные данные [5,6]. Итерационными методами решения задач называют такие методы, в которых по известному приближению ищется следующее, более точное приближение. Итерационные методы находят широкое применение в практике восстановления сигналов, так как в некоторых случаях они допускают простой учет важных для задач восстановления ограничений непосредственно в схеме

итерационного алгоритма и тем самым представляют собой альтернативу методам нелинейного программирования.

Схема предлагаемого итерационного удаления шума выглядит следующим образом:

$$\varphi^{(i+1)} = W^{-1} \Theta W \varphi^{(i)}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где в качестве первого приближения используется экспериментальный сигнал $\varphi^{(0)} = f$, W - дискретное вейвлет-преобразование, W^{-1} - обратное дискретное

вейвлет-преобразование, $\Theta w_{jk} = \begin{cases} w_{jk} - \tau, & \text{если } w_{jk} \geq \tau \\ w_{jk} + \tau, & \text{если } w_{jk} \leq -\tau \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$ - оператор ограничения

вейвлет-коэффициентов, τ - величина порога, $w_{jk} = W \varphi$ - коэффициенты дискретного вейвлет-преобразования сигнала φ . Увеличение на каждом шаге итерации величины порога на некоторое значение δ позволяет эффективно удалять шум. Общим недостатком итерационных алгоритмов является то, что исследователь должен сам решать, когда следует прервать процесс итераций, руководствуясь теми или иными соображениями о природе сигнала. С одной стороны, это дает возможность экспериментатору на каждом шаге итерации оценивать выборку последовательных приближений и добиваться качества восстановления сигнала, соответствующего его априорным знаниям об эксперименте. Но с другой стороны, субъективность экспериментатора может привести к неправильным результатам. Особенно это актуально при обработке оптических спектров звезд высокого и сверхвысокого разрешения, так как в этом случае форма спектральной линии может быть априори неизвестна, и экспериментатор может не иметь представления о том, как должен выглядеть восстановленный сигнал. В работе предлагается использовать априорную информацию о шуме для принятия решения об остановке итерационного процесса. Производится процедура вычисления количественной характеристики M_j на каждом масштабе для удаляемого шума. В качестве параметра M_j могут выступать показатель Херста, относительная дисперсия и размерность Ричардсона. После этого производится сравнение величины M_j с

априорно известным значением $M_{j \hat{\alpha} \hat{\delta}}$, рассчитываемым по записанной в эксперименте шумовой дорожке. Если $M_j \approx M_{j \hat{\alpha} \hat{\delta}}$, то итерационный процесс прерывается и производится восстановление сигнала:

$$\varphi = W^{-1} w_{jk}. \quad (5)$$

В противном случае выполняется следующая итерация. Показано, что данная схема позволяет произвести восстановление формы сигнала в случае малого отношения сигнал/шум и коррелированной структуры шума. Учет априорной информации позволяет принять решение о прерывании итерационного процесса, что позволяет, в свою очередь, получать результаты восстановления сигнала независимо от субъективного вмешательства экспериментатора.

Были проведены модельные эксперименты с целью сравнения эффективности различных методов обработки экспериментальных данных [13,16].

На рис.1 приведена зависимость среднеквадратичного отклонения σ_2 от

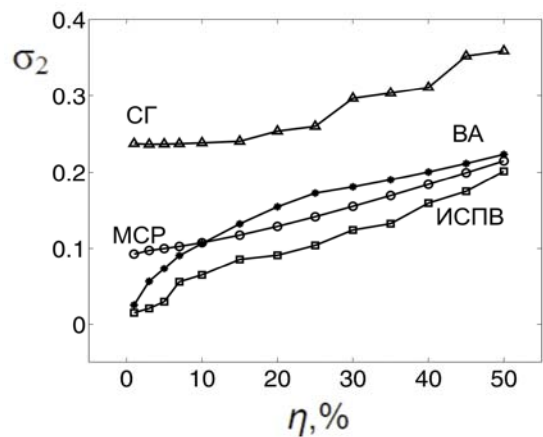


Рис.1. Зависимость σ_2 от η .
Показатель Херста шума $H=0.7$

относительного уровня шума η в сигнале для методов Савицкого-Голея (СГ), метода статистической регуляризации (МСР), вейвлет-денойзинга с выбором порога по критерию Донохо-Джонстоуна (ВА) и ИСПВ. При этом было показано, что наилучшие результаты достигаются при использовании итерационной схемы удаления шума в вейвлет-пространстве.

Третья глава посвящена апробации предлагаемых подходов для обработки спектральных линий, полученных при наблюдении звезды Вега на 2-м телескопе пика Терскол [2,5-7,17]. Для анализа экспериментального шума были выделены участки непрерывного спектра, в которых отсутствуют линии поглощения атмосферы звезды. Вейвлет-анализ, значения показателя Херста, размерности Ричардсона и относительной дисперсии выявили низкочастотную природу шума и наличие в нем положительной корреляции. Таким образом, при обработке экспериментальных контуров звезды Вега следует использовать итерационную схему удаления шума в вейвлет-пространстве. При этом известно, что полуширина аппаратной функции прибора на порядок меньше, чем у регистрируемых спектральных линий, и поэтому при обработке экспериментальных данных не учитывалось влияние аппаратной функции. Искажения, вносимые турбулентностью земной атмосферы, не учитывались, так как они эффективно усредняются на временах экспозиции. На рис.2 в качестве иллюстрации приведены результаты обработки двух близкорасположенных контуров спектральных линий Fe I 5269.5 Å и Ca I 5270.4 Å. При этом линии характеризуются асимметрией, такой, что синяя часть более глубокая, чем красная. Линия Fe I 5269.5 Å обладает также ядром, “вогнутым вверх” в центре. На рис.3 приведены результаты удаления шума из участка спектра 4728.8-4732.5 Å. Контур линии S II 4729.45 Å характеризуется асимметричной формой, контур линии Fe II 4731.47 Å имеет ядро в виде “плоского дна”.

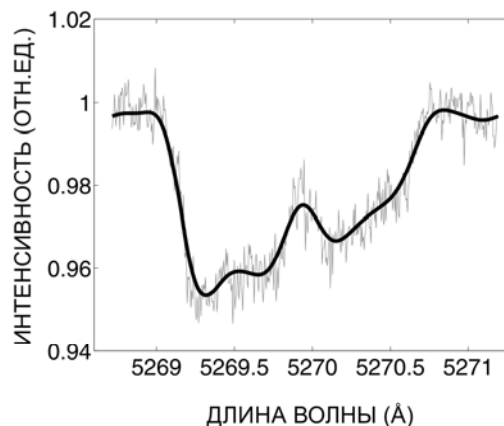


Рис.2. Удаление шума из участка экспериментального спектра звезды Вега. Интервал длин волн 5268.8-5271.2 Å.

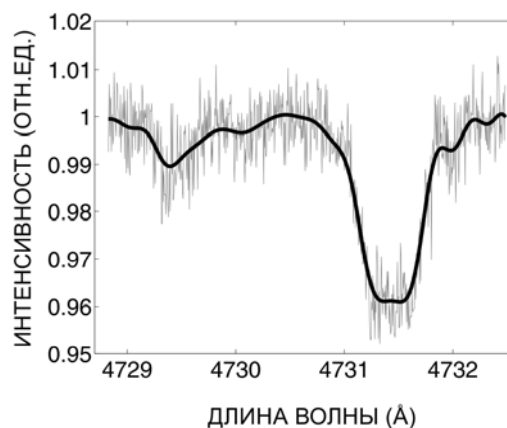


Рис.3. Удаление шума из участка экспериментального спектра звезды Вега. Интервал длин волн 4728.8-4732.5 Å.

С использованием итерационной схемы удаления шума в вейвлет-пространстве было подтверждено, что спектр звезды Вега состоит из спектральных линий с разной формой контуров. В дальнейшем профили спектральных линий, обработанные с использованием итерационной схемы в вейвлет-пространстве, предполагается использовать для уточнения количественных характеристик атмосферы звезды Вега, а также при исследовании других звезд, для которых удастся провести наблюдение слабых спектральных линий с высоким и сверхвысоким разрешением.

Основные результаты и выводы

1. В работе использованы фурье-анализ, вейвлет-анализ и характеристики шума, такие как показатель Херста, относительная дисперсия, размерность Ричардсона, энтропия, для получения априорной информации о спектроскопическом эксперименте. Предложено определять характеристики шума в вейвлет-пространстве. Это дало возможность получить более полную информацию о свойствах экспериментального шума.
2. Проведено исследование эффективности восстановления сигналов с использованием различных базисных вейвлетов семейств койфлетов, вейвлетов Добечи и биортогональных вейвлетов. Показано, что койфлет пятого порядка вносит наименьшие искажения в сигнал.
3. Было показано, что с помощью дискретного вейвлет-анализа возможно удаление высокочастотного шума без привлечения априорной информации о структуре шума.
4. Разработанный метод удаления шума, основанный на применении итерационной схемы в вейвлет-пространстве, позволяет восстановить сигнал в случае коррелированной структуры шума.
5. С помощью предлагаемых методов и подходов была проведена математическая обработка спектральных линий звезды Вега. Была выявлена низкочастотная структура экспериментального шума, показана сложная форма линий, которая в дальнейшем может быть использована для уточнения количественных характеристик атмосферы звезды Вега.

Список авторской литературы

1. Сибгатуллин М.Э. Исследование периодических сигналов с фрактальным гауссовым шумом // М.Э. Сибгатуллин, Д.З. Галимуллин, А.Ю. Воробьев, С.С. Харинцев, И.Ф. Бикмаев, М.Х. Салахов // IX всероссийская молодежная научная конференция “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сб. ст. – Казань, 2005. –С.107–110.
2. Сибгатуллин М.Э. Исследование аппаратных шумов в оптической астрономии / М.Э. Сибгатуллин, Д.З. Галимуллин, С.С. Харинцев, И.Ф. Бикмаев, М.Х. Салахов // Электронный журнал "Исследовано в России".– 2006.–№67.–С.668-676. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/067.pdf>
3. Сибгатуллин М.Э. Удаление фрактального шума в оптических спектрах с помощью вейвлет-денойзинга / М.Э.Сибгатуллин, С.С.Харинцев, М.Х.Салахов // Юбилейная научная конференция физического факультета. – Казань, 2004. –С. 101.
4. Сибгатуллин М.Э. Введение априорной информации о спектре в схему вейвлет-денойзинга / М.Э.Сибгатуллин, С.С.Харинцев, М.Х.Салахов // VIII всероссийская молодежная научная конференция “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сб. ст. – Казань, 2004. –С. 71–76.
5. Сибгатуллин М.Э. Итерационная схема удаления шума из оптических спектров / М.Э. Сибгатуллин, С.С. Харинцев, И.Ф. Бикмаев, М.Х. Салахов // IX всероссийская молодежная научная конференция “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сб. ст. – Казань, 2005. –С. 145–148.
6. Сибгатуллин М.Э. Удаление экспериментального шума из оптических спектров с использованием итерационной схемы на основе вейвлет-анализа / М.Э. Сибгатуллин, С.С. Харинцев, И.Ф. Бикмаев, М.Х. Салахов // Ученые записки Казанского государственного университета. Сер физико-математические науки. Том 148 / КГУ; Редкол.: И.Б.Бадриев и др.–Казань, 2006. –С.179–185.
7. Сибгатуллин М.Э. Математическая обработка оптических спектров звезд / М.Э.Сибгатуллин, С.С.Харинцев, И.Ф. Бикмаев, М.Х.Салахов // VII всероссийская молодежная научная конференция “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сб. ст. – Казань, 2003. –С. 139–144.

8. Сибгатуллин М.Э. Регуляризованные алгоритмы для сглаживания и денойзинга спектроскопических данных / М.Э. Сибгатуллин // Итоговая научная студенческая конференция физического факультета Казанского Государственного Университета. – Казань, 2003. –С. 63.
9. Сибгатуллин М.Э. Детектирование детерминированной компоненты в оптических спектрах / Г.В. Фролова, М.Э. Сибгатуллин, Д.З. Галимуллин, С.С. Харинцев, Г.Г. Ильин, М.Х. Салахов // IX всероссийская молодежная научная конференция “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сб. ст. – Казань, 2005. –С. 279–282.
10. Сибгатуллин М.Э. Регуляризация обратных некорректных задач в прикладной спектроскопии / Д.З. Галимуллин, М.Э. Сибгатуллин, С.С. Харинцев, М.Х. Салахов // Известия РАН. Серия физическая. –2006, 70(4), 2006, С.534-535.
11. M.E. Sibgatullin A wavelet-based technique for eliminating noise from optical spectra / M.E. Sibgatullin, S.S. Kharintsev, Il'in G.G., M.Kh. Salakhov // AJS.– 2005.–V.9, N.1-4. –P. 43–48.
12. Сибгатуллин М.Э. Определение структуры сложного контура с учетом влияния случайного шума / Д.З. Галимуллин, А.Ю. Воробьев, М.Э. Сибгатуллин, С.С. Харинцев, М.Х. Салахов // IX всероссийская молодежная научная конференция “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сб. ст. –Казань, 2005. –С.197–200.
13. Sibgatullin M.E. Smoothing and denoising optical spectra / M.E. Sibgatullin, S.S. Kharintsev, M.Kh. Salakhov // AJS. –2004. –V.8, N.3-4. –P. 91–100.
14. Сибгатуллин М.Э. Выбор базисного вейвлета в задаче денойзинга оптических спектров / А.Г. Зверев, М.Э. Сибгатуллин, С.С. Харинцев, М.Х. Салахов // IX всероссийская молодежная научная конференция “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сб. ст. – Казань, 2005. –С. 229–232.
15. Сибгатуллин М.Э. Адаптивный вейвлет-анализ нестационарных сигналов прикладной спектроскопии / М.Э. Сибгатуллин, А.А. Севастьянов, С.С. Харинцев, М.Х. Салахов // VI всероссийская молодежная научная конференция “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сб. ст. – Казань, 2002. –С. 133–138.

16. Сибгатуллин М.Э., Сглаживание и денойзинг оптических спектров: преимущества и недостатки / М.Э.Сибгатуллин, С.С.Харинцев, М.Х.Салахов // VIII всероссийская молодежная научная конференция “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сб. ст. – Казань, 2004. –С. 65–70.
17. Sibgatullin M.E. Noise elimination from stellar spectra / M.E.Sibgatullin, D.Z.Gallimullin. S.S.Kharintsev, I.F.Bikmaev, M.Kh. Salakhov // Proc. SPIE. – 2006. –V. 6181. –P. 618119-1–618119-7.